

## ニッケル-銅合金の低速度における摩耗形態の遷移

著者	三井田 勝久
号	723
発行年	1978
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9459">http://hdl.handle.net/10097/9459</a>

氏 名	三 井 田 勝 久
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 54 年 3 月 27 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 金属工学専攻
学 位 論 文 題 目	ニッケル－銅合金の低速度における摩耗形態の遷移
指 導 教 官	東北大学教授 大平 五郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大平 五郎      東北大学教授 島田 平八 東北大学教授 高橋 裕男

## 論 文 内 容 要 旨

低摩擦速度，低荷重において，摩擦面に酸化皮膜が形成され，これにより摩耗率が急減することが知られている。このような皮膜は，工業的には機械のなじみ運転と関連した問題であるが，常温附近における摩擦面上での急速な酸化物の形成は，トライボケミカル反応として工学的にも注目されるものである。

従来低速度におけるマイルド摩耗皮膜の形成機構に関しては，鋳鉄や鉄を用いたいくつかの研究があるが，未だ十分明らかとは言えない。この原因の 1 つは，摩耗現象が摩擦面の薄い層に限られるため詳細な観察が困難であることと，摩耗が 2 つの試験片の接触現象であるにも拘らず，試験片の形状から観察が両試験片を分離した後個々に行われていたためと考えられる。本実験においては，横型の円筒式摩耗試験機を用いることにより，同一形状の試験片を組み合わせることができたが，さらに「直角断面」を観察することにより，摩擦面間の状況を保存したまま観察することができた。

直角断面とは，試験終了後試験片を装置に取付けたまま接着剤を摩擦面間に侵透させ，固化した後装置より取外して摩擦面に直角に切断および研磨したものである。従来，摩擦面に残留した摩耗粉がその後の摩耗挙動に大きな影響を与えていることは知られていたが，このような観察を行うことにより，摩擦面間に遊離した摩耗粉の挙動が明瞭となり，この挙動を観察することによりマイルド摩耗皮膜形成の機構を明らかにすることができた。

皮膜形成の機構を調べるのが本研究の主目的であるが、各種ニッケル-銅合金の摩耗試験を行ったところ、ニッケル高濃度合金でのみ皮膜が形成され、銅高濃度合金では形成されなかった。この原因は現象的には発生する摩耗粉の大きさの違いで説明できるが、この合金組成による摩耗粉の違いが金属のいかなる性質の差によるものであるかを調べることを副目的としている。従来、摩耗粉の大きさを決定する因子として、金属の化学的性質を強調する研究者と機械的性質を強調する研究者がいる。ニッケル-銅合金は、化学的性質を異にしながらも全ての組成で単相合金を作り、機械的強度は合金中で最大値を示す。上述の2つの性質を分離する目的に対して、このような合金系を用いることは適切であると考えられる。

本論文は全部で9章より成り、このうち3～7章に実験結果が述べられている。主要な結果は第6章に述べられており、以下この章を中心に本論文の要旨を記述する。

第1章は緒言で、従来報告されている低速度における摩耗形態の遷移およびシビヤ摩耗-マイルド摩耗遷移の機構について述べ、本研究の目的および意義について述べている。

第2章は実験装置および試料について述べている。本実験のため新たに摩耗試験装置を製作したが、この装置の能力、利点が記述されている。この種の装置では摩擦経過に伴う熱の蓄積が存在しないことが必要であるが、試験片端面にテーパーをつけ、これを試験片ホルダーのテーパー穴にはめ込むことにより熱の蓄積が無視できる程度であることが確認されている。

第3章からは実験結果で、低速度において現われる摩耗形態について述べている。従来、低速度において現われる摩耗形態として、シビヤ摩耗とマイルド摩耗があるが、この分類方法と同時に、微細摩耗粉摩耗と粗大摩耗粉摩耗とに分類した。この2つの摩耗形態の区別は、摩擦面の肉眼観察により行い、摩擦面が金属色の場合を粗大摩耗粉摩耗、金属色と黒色のまだら模様を作っている場合を微細摩耗粉摩耗とした。そしてこのような分類を行った理由および各摩耗形態と摩耗進行曲線、摩耗特性曲線との関係が述べられている。

第4章において、これら摩耗形態の遷移に及ぼす摩擦条件の影響を調べた結果が述べられている。一定荷重(500g)、一定湿度(相対湿度15%)の下に、摩擦速度(1.1～254 mm/s)と合金組成を変化させ、定常摩耗における摩耗形態を調べた。マイルド摩耗はニッケル高濃度合金で低速度で現われたが、マイルド摩耗を示す最大の摩擦速度をシビヤ摩耗-マイルド摩耗遷移速度とすると、これは純ニッケルで最も高く(127 mm/s)、銅含有量の増加とともに直線的に減少し、銅含有量45%以上では全ての摩擦速度でシビヤ摩耗となった。また摩耗粉遷移速度(定常摩耗において微細摩耗粉摩耗を示す最大摩擦速度)はシビヤ摩耗-マイルド摩耗遷移速度と同じか、それより高い摩擦速度であったが、やはり純ニッケルで最も高く、銅含有量の増加とともに直線的に減少し、銅高濃度合金では全ての摩擦速度で粗大摩耗粉摩耗であった。

粗大摩耗粉摩耗領域では、初期摩耗から定常摩耗まで摩耗形態に変化はない。微細摩耗粉摩耗領域では、初期摩耗で粗大摩耗粉摩耗であったものが、定常摩耗で微細摩耗粉摩耗となるが、微細摩耗粉摩耗領域内に存在するマイルド摩耗領域では、微細摩耗粉摩耗からさらにマイルド摩耗へと変化している。

第5章においては、粗大摩耗粉摩耗領域における直角断面を観察している。純銅の場合、

M. Cocks や M. Antler が同じく純銅で観察したと同様、摩擦面の塑性変形層が局部的に肥大化し、隆起しているのが観察された。合金中にニッケルが含まれると、塑性変形層の一部が摩擦面から分離し、摩擦面間に介在するようになる。ニッケル高濃度合金では、比較的高い摩擦速度（粗大摩耗粉摩耗領域）ではこのような接触状況が継続したが、低速度（微細摩耗粉摩耗領域）では摩擦経過に伴い介在粒子が次第に減退し、消失した。摩擦経過による介在粒子の減退については、M. Cocks がニッケルについて、また Landheer らが鋼について、その事実のみを報告している。

第 6 章は、微細摩耗粉摩耗領域の観察を行っている。微細摩耗粉摩耗においては、摩擦面に肉眼で黒く見える程度の細かい（約  $10\ \mu\text{m}$  以下）摩耗粉が集積し、まだら模様を作っているが、この摩耗粉の挙動を調べるため直角断面を観察した。これにより摩擦面間に遊離した摩耗粉が摩擦面に存在するくぼみに集積し縞模様状の組織を作っていることが分った。縞模様層の硬さを測定したところ、下地よりも著しく硬くなっていた。また EPMA により酸素濃度を測定したところ、顕著な酸素量が検出された。この様に、相当酸化した遊離摩耗粉が、そのまま排出されることなく、再び下地に循環して硬い組織を作っている。この様な挙動は従来の凝着摩耗機構では十分説明できない。そこでこの様な作用を摩耗粉の集積作用と呼ぶことにした。この縞模様層は硬いため脆いと考えられ、再び摩耗してできた摩耗粉はさらに微細化する。しかし同時にまだら模様の金属色の部分では、新鮮面も摩耗するため微細摩耗粉摩耗が継続する。この状態で発生する摩耗粉の粒度分布を走査型電顕で調べると、粒度分布に 2 つのピークが現われていることが分る。しかし僅かな摩擦条件の変化により、まだら模様中に占める黒い部分の割合が増加し、ついには摩擦面全面が黒または黒褐色のエナメル状の皮膜に覆われる。このような皮膜が形成されると摩耗が一時停止する。

皮膜の下層に存在する縞模様層は、灰色層と白色層よりなる層状組織であるが、これは履歴の異なった粒子が集積した後、塑性変形を受けてできたものである。初期のものは、灰色層の幅は狭く、色も薄い、次第に灰色層の幅が拡大し、色が濃くなる。白色層の幅が薄くなると一部不連続になるが、完全に不連続になったものがマイルド摩耗皮膜である。皮膜中には白い粒子が多数点在している。縞模様層の酸素濃度を EPMA で分析したところ、灰色層で高く白色層で低かったが、灰色層の色が濃くなるに従って酸素濃度が増加し、NiO の酸素量を基準にして約 45% の酸素量が存在するようになる。この様な縞模様層が摩耗し、さらに集積すると縞模様層を代りにマイルド摩耗皮膜を作る。

このように、摩耗粉の集積作用により摩擦面に酸化物が次第に蓄積され、ついには酸化物皮膜が形成されるが、摩擦熱による温度上昇のほとんど存在しない摩擦条件で極めて短時間に作られることを考えると、静的な酸化では予想できない急速な酸化である。この原因を調べるため、各摩擦距離摩擦した摩擦面上の摩耗粉を二段レプリカ法により採取し、透過電顕により観察した。この結果摩擦開始直後より、少量ではあるが細かい（約  $1\ \mu\text{m}$  以下）摩耗粉を発生していたが、この様な摩耗粉では結晶粒が微細化し、一部は  $50\sim 100\ \text{\AA}$  の大きさになり、酸化がこの結晶粒の大きさで進行していることが分った。摩擦経過に伴い、結晶粒の微細化と酸化の進行とが僅かに認

められるが、摩擦開始直後のものと大きな変化はなく、酸化物の蓄積が細かい粒子の数が増加することによりなされていることが分った。皮膜形成時の粒子を観察すると、粒子表面の結晶粒が $100\text{\AA}$ 程度に微細化し、これがブドウの房の様に集っていた。皮膜形成後さらに摩擦したものは、粒子全体がブドウの房状になっていたが、この様な粒子は全て酸化物になっていた。

第6章では、マイルド摩耗皮膜の安定性について述べている。従来報告されているマイルド摩耗皮膜は、摩耗方式、金属の種類、摩擦条件などにより様相が異なり、このためこの分野の研究が不明瞭になっている。本章では、前章まで取扱ってきた皮膜とは様相を異にする、鏡面状の光沢を有する皮膜に関して記述し、従来報告されている皮膜との関連を明らかにしている。

第7章は、異質摩耗における摩耗形態の遷移について述べている。遷移に及ぼす合金組成の影響に硬さの影響は全く現われず、組合わせる試験片の平均組成により決定されることが述べられている。

第8章は、3～7章の実験結果を考察したもので、摩耗形態の遷移に及ぼす合金組成の影響が、合金の化学的性質により決定され、機械的強度の影響は二義的なものであることを考察している。

摩擦面における急速な酸化の進行に関しては、酸化が $50\sim 100\text{\AA}$ の単位で進行していることと、従来知られている初期の急速な酸化皮膜（厚さ $10\sim 20\text{\AA}$ ）の形成とから、微細結晶粒間の大きな拡散係数を考慮すれば十分説明できることが考察されている。

第9章は結論で、得られた結果を総括している。

## 審 査 結 果 の 要 旨

摩擦による金属の損耗量および形態は荷重、摩擦速度などの条件で急変する場合のあることは知られていて、近年この遷移に関して物理的、機械的立場からの検討と併せて材料のガス吸着、酸化、凝着などの面からの研究が緒につき始めた。

著者は全率固溶体を形成するNi-Cu系合金の全組成範囲に亘る合金試料を作成し、摩擦熱による温度上昇を考慮外におけるような低摩擦速度領域で一連の摩耗実験を行い、摩耗形態と合金組成の関係、遷移におよぼす諸因子、摩擦面と摩耗粉の様相について研究した。本論文はその経緯をまとめたもので全編9章より成っている。

第1章は緒論で、従来の研究の概要と本研究の目的および意義について述べている。

第2章では本研究の目的に合うような装置の製作、試料の作製、組織学的な測定法からさらに摩擦条件すなわち荷重、雰囲気中の酸素分圧、湿度、温度などの調整法と摩耗量の測定法などについて記述している。

第3章では摩耗形態の分類法として従来の摩耗率による分類の他に、摩耗粉の大きさによる分類を導入し、これを用いることによって摩耗形態の遷移をより合理的に解釈できることを示している。

第4章では同質摩耗の定常状態時の摩耗形態と合金組成の関係を摩擦速度を変えて調べ、その遷移の様相、遷移におよぼす諸条件の影響を研究した結果を述べている。Ni高濃度合金では比較的苛酷な条件でも微細摩耗粉摩耗になり、特に低摩擦速度では摩耗率が零に近いマイルド摩耗形態を示す。合金中のCu濃度が増すにつれ遷移速度は低下し、Cu高濃度では粗大摩耗粉摩耗のみになる。雰囲気中の酸素分圧は特にこの遷移速度に強い影響を与えることを示している。

第5章および第6章では各摩耗状態における摩擦面と摩耗粉を詳細に調べた結果を述べている。特にマイルド摩耗領域で現われる縞模様組織の解析をEPMA、走査電顕、透過電顕によって行い、酸化物を含んだ微粉が摩擦面上に蓄積されていく状態を明らかにしている。

第7章では異質摩耗について述べ、同質摩耗との比較を行っている。

第8章では上述の実験結果に基づいて摩耗粉の形成とその変質過程、摩耗面での離脱と集積等の観点から摩耗粉形態の遷移を論じている。

第9章は総括である。

以上要するに、本論文は低摩擦速度における摩耗形態の遷移の機構をNi-Cu合金を用いて研究したもので、遷移の過程でおこる摩耗粉の複雑な集積作用、縞模様の形成、酸化物の蓄積など摩耗現象に関して一知見を加えたものであって、得られた成果は金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。